

УДК 536:621.9 (075.8)

Усов А.В., д-р техн. наук, Куницын М.В., аспирант, Одесса, Украина

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИЛИНДРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрены возможности повышения надёжности и долговечности цилиндрической группы технологическими методами, в том числе использование покрытий из износостойких материалов на рабочие поверхности цилиндров. Анализ причин образования сколов и трещин на обрабатываемых поверхностях указанных изделий показал, что появление этих дефектов связана с тепловыми процессами, которые сопровождают механическую обработку. Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием. Проведено трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂, полученных методом электрохимического осаждения.

Ключевые слова: эксплуатационные характеристики, трибокоррозия, износостойкость, отслоение, термомеханические процессы, шлифование, покрытие.

Розглянуто можливості підвищення надійності і довговічності циліндричної групи технологічними методами зокрема використання покриттів зі зносостійких матеріалів на робочі поверхні циліндрів. Аналіз причин утворення сколів та тріщин на оброблюваних поверхнях зазначених виробів показав, що поява цих дефектів пов'язана з тепловими процесами, які супроводжують механічну обробку. Розроблено аналітичну модель по визначенню термомеханічного стану робочої поверхні циліндра з зносостійким покриттям. Проведено трибокорозійне дослідження композиційних матеріалів на основі Ni/Ni-TiO₂, отриманих методом електрохімічного осадження.

Ключові слова: експлуатаційні характеристики, трибокорозія, зносостійкість, відшарування, термомеханічні процеси, шліфування, покриття.

The possibilities of increasing the reliability and durability of a cylindrical group by technological methods are considered, including the use of coatings from wear-resistant materials on the working surfaces of cylinders. An analysis of the reasons for the formation of chips and cracks on the surfaces of these products showed that the appearance of these defects is associated with the thermal processes that accompany the machining. An analytical model has been developed to determine the thermomechanical state of the working surface of a cylinder with a wear-resistant coating. Tribocorrosive studies of composite materials based on Ni/Ni-TiO₂ obtained by electrochemical deposition were carried out.

Keywords: reliability, durability, tribocorrosion, wear resistance, detachment, thermomechanical processes, diamond-abrasive processing.

Постановка проблемы

Анализ исследований по трибологии показал, что за полный жизненный цикл машин эксплуатационные расходы в несколько раз превышают затраты на изготовление новой техники. Потери средств от трения и износа в развитых государствах достигают 4...5% национального дохода [0].

Повышение долговечности машин непосредственно связано с износостойкостью деталей машин. Таким образом, повышение

износостойкости деталей машин является актуальным направлением исследований. Долговечность многих машин определяется износостойкостью деталей, имеющих внутренние цилиндрические поверхности, работающие в условиях трения скольжения.

Анализ последних исследований и публикаций

Известно, что задача повышения износостойкости конкретного изделия часто не предусматривает качественной модификации структурного состава используемого материала во всем его объёме, а переносится на видоизменение поверхностного слоя материала, поскольку защита сопрягаемых деталей от износа в ряде случаев решается поверхностным упрочнением. В общем случае под поверхностным упрочнением понимается повышение твёрдости рабочей поверхности детали, что позволяет увеличить износостойкость [0, 0].

Повышению механических характеристик трущихся поверхностей посвящено большое число работ, в результате которых предложены различные способы упрочнения. Перспективные направления развития поверхностно-упрочняющих технологий предполагают использование новых методов получения износостойких покрытий, в основном с использованием износостойких материалов, т.е. покрытий на основе соединений типа оксидов, нитридов и карбидов. Образование упрочняющих покрытий из разнородных материалов приводит не только к модификации поверхностного слоя, но и к образованию, в ряде случаев, принципиально нового композиционного материала поверхностного слоя, обладающего как высокой прочностью и достаточной пластичностью, так и повышенной износостойкостью [0 - 0].

Формулировка цели исследования

При поступательном движении поршня в цилиндре, имеющем некруглость δ на его рабочей поверхности формируются зоны частичного отслоения покрытия. Эти участки под действием рабочих касательных напряжений могут достигать таких значений, при которых происходит отслаивание покрытия от матрицы цилиндрической поверхности. Изготовление цилиндров с нанесением на их рабочие поверхности износостойких покрытий связано с технологическими операциями по их обработке, которые сопровождаются термомеханическими явлениями.

Поэтому целью исследования являются термомеханические процессы в изделиях с покрытием при их обработке и эксплуатации для определения условий образования дефектов отслоения покрытий от основного материала и их устранения с учётом физико-механического состояния поверхностного слоя, технологических параметров финишной обработки и наследственных дефектов.

Изложение основного материала исследования

Найдём, при каких технологических параметрах, связанных с

шероховатостью рабочей поверхности цилиндра и его геометрической погрешностью, а также физико-механических свойств покрытия и материала цилиндра, происходит разрушение собственно покрытия.

Расчётная схема по определению напряженно-деформированного состояния системы цилиндр-покрытие следующая (Рис. 1.).

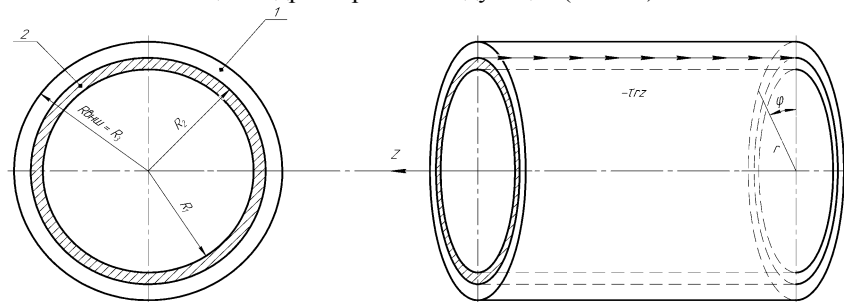


Рисунок 1. Расчётная схема: 1 – тело цилиндра; 2 – тело покрытия

Рассмотрим уравнение теплопроводности для двухслойного цилиндра при симметричном нагревании, со свободным теплообменом с внутренней и внешней поверхности цилиндра. Температура и тепловой поток окрестности границы раздела изменяется непрерывным образом. Иными словами, получаем следующую задачу: найти непрерывную функцию температуры $t_i(r, \tau)$ в области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau < \infty]$, удовлетворяющую уравнению $[0, 0, 0]$:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \alpha_i \left(\frac{\partial^2 t_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_i}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где $i = 1$ для первой области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau < \infty]$

$i = 2$ для второй области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau < \infty]$

граничным условиям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_1}{\partial r} - h_1[t_1 - T_1(\tau)] &= 0, \text{ при } r = R_1, \\ \frac{\partial t_2}{\partial r} - h_2[t_2 - T_2(\tau)] &= 0, \text{ при } r = R_2; \end{aligned} \quad (2)$$

условиям сопряжения:

$$t_1 = t_2, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r}, \text{ при } r = R_2; \quad (3)$$

начальному условию:

$$t_i(r, 0) = \Phi_i. \quad (4)$$

Здесь α_i, h_i, λ_i — коэффициенты температуропроводности,

относительной теплоотдачи и теплопроводности, соответственно покрытия ($i=2$) и основного материала ($i=1$).

Функции $(\Phi_i) \bar{r}, (T_i) \bar{\tau}$ удовлетворяют таким условиям:

а) $T_i(\tau)$ — дифференцируемая по τ функция.

Кроме того

$$\int_0^{\tau} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \left[A I_0 \left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}} \right) + B N_0 \left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}} \right) \right] \exp[-\gamma_n^2(\tau - \bar{\tau})] dr d\bar{\tau} < \infty$$

б) $\Phi_i(r)$ — непрерывная по r функция, производная которой может иметь разрыв первого рода при $r = R_2$.

Решение задачи будем искать в виде

$$t_i = [T_2(\tau) - T_1(\tau)](A_i \ln r + B_i) + T_i(\tau) + \Theta_i(r, \tau) \quad (5)$$

Получаемая для Θ_i задача решается методом конечных интегральных преобразований, ядра $u_{in}(r)$ которых удовлетворяют уравнению Бесселя

$$u_{in}'' + \frac{1}{r} u_{in}' + \frac{\gamma_n^2}{\alpha_i} u_{in} = 0, \quad (6)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} u_{in}' - h_1 u_{in} &= 0 \text{ при } r = R_1, \\ u_{1n} &= u_{2n}, \gamma_1 u_{1n} = \gamma_2 u_{2n} \text{ при } r = R_2; \\ u_{2n} + h_2 u_{2n} &\text{ при } r = R_3; \end{aligned} \quad (7)$$

Окончательное решение задачи запишется как

$$t_i(r, \tau) = \psi_i(r, \tau) + \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\gamma_n^2 \tau) \left[\Theta_n(0) + \int_0^{\tau} \frac{d\psi_n(\bar{\tau})}{d\bar{\tau}} \exp(-\gamma_n^2 \bar{\tau}) d\bar{\tau} \right] u_{in}(r).$$

Здесь $\psi_i(r, \tau) = [T_2(\tau) - T_1(\tau)](A_i \ln r + B_i) + T_i(\tau)$.

Для определения напряжённо-деформированного состояния цилиндра с покрытием, подверженного действию температурного поля, рассмотрим следующую задачу. Двухслойный неограниченный полый цилиндр подвержен действию температурного поля $t_i = t_i(r, \tau)$. Материал цилиндра и покрытие соприкасаются по всей поверхности раздела и, следовательно, перемещения на поверхности раздела будут непрерывными. Другое условие на границе раздела получаем из условия непрерывности нормальных напряжений σ_r . На внешних поверхностях σ_r полагаются равными нулю. Таким образом имеем следующую задачу: найти непрерывную функцию деформации $u_i(r, \tau)$ в области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau \leq \tau_0]$, удовлетворяющую уравнению

$$\frac{1}{c_i^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_i}{\partial r} - \frac{u_i}{r^2} - m_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} \quad (8)$$

где $i=1$ для первой области, то есть когда r изменяется от R_1 до R_2 и $i=2$ для второй области, когда r изменяется от R_2 до R_3 ; $u_i(r, \tau)$ — перемещение, c_i — скорость распространения волн расширения в упругой среде; граничным условиям

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial r} + p_1 u_1 &= m_1 t_1, \text{ при } r = R_1, \\ \frac{\partial u_2}{\partial r} + p_2 u_2 &= m_2 t_2, \text{ при } r = R_3; \end{aligned} \quad (9)$$

условиям сопряжения:

$$u_1 = u_2, p_{12} \frac{\partial u_1}{\partial r} + q_{12} u_1 = \frac{\partial u_2}{\partial r} + p_{12} m_1 t_1 - m_2 t_2 \text{ при } r = R_2; \quad (10)$$

начальным условиям:

$$u_i(r, 0) = \phi_i(r), \frac{\partial u_i(r, 0)}{\partial \tau} = \psi_i(r). \quad (11)$$

Решение этой задачи будем искать в виде:

$$u_i(r, \tau) = \psi_i(r, \tau) + \theta_i(r, \tau), \quad (12)$$

здесь

$$\psi_i(r, \tau) = A_i(\tau)r + \frac{B_i(\tau)}{r} + \frac{m_i}{r} \int_{R_i}^r t_i(\rho, \tau) \rho d\rho \quad (13)$$

квазистатическое решение задачи (8) – (11). $A_i(\tau)$ и $B_i(\tau)$ — некоторые функции, которые выбираются так, чтобы для функции $\theta_i(r, \tau)$ получились однородные граничные условия. Полученная для θ_i задача решается методом конечных интегральных преобразований.

Соответствующие формулы обращения имеют вид

$$\Theta_n = \frac{p_{12}}{c_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \Theta_1 \omega_{1n} r dr + \frac{1}{c_2^2} \int_{R_2}^{R_3} \Theta_2 \omega_{2n} r dr, \quad (14)$$

$$\Theta_i = \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_n \omega_{in} (R_i \leq r \leq R_{i+1}). \quad (15)$$

Здесь $\omega_{in}(r)$ решение уравнения Бесселя

$$\omega_{in}'' + \frac{1}{r} \omega_{in}' + \left(\frac{\gamma_n^2}{c_i^2} - \frac{1}{r^2} \right) \omega_{in} = 0, \quad (16)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \omega_{1n}' + p_1 \omega_{1n} &= 0 \text{ при } r = R_1, \\ \omega_{1n} = \omega_{2n}, p_{12} \omega_{1n}' + q_{12} \omega_{1n} &= \omega_{2n}' \text{ при } r = R_2, \\ \omega_{2n}' + p_2 \omega_{2n} &= 0 \text{ при } r = R_3. \end{aligned} \quad (17)$$

Для определения ϑ_n имеем уравнение

$$\frac{d^2 \vartheta_n}{d\tau^2} + \gamma_n^2 \vartheta_n = -\frac{d^2 \bar{\psi}_n}{d\tau^2}, \quad (18)$$

с начальными условиями:

$$\vartheta_n = \bar{\varphi}_n - \bar{\psi}_n, \quad \frac{d\vartheta_n}{d\tau} = \bar{\varphi}_n' - \frac{d\bar{\psi}_n}{d\tau} \text{ при } \tau = 0. \quad (19)$$

Решение уравнения (18) с начальными условиями (19) запишется так

$$\vartheta_n = c_{1n} \cos \gamma_n \tau + c_{2n} \sin \gamma_n \tau - \frac{1}{\gamma_n} \int_0^\tau \frac{d^2 \bar{\psi}_n}{d\tau^2} \sin[\gamma_n(\tau - \bar{\tau})] d\bar{\tau}, \quad (20)$$

где

$$c_{1n} = \bar{\varphi}_n(0) - \bar{\psi}_n(0), \quad c_{2n} = \frac{1}{\gamma_n} \left[\bar{\varphi}_n'(0) - \frac{d\bar{\psi}_n(0)}{d\tau} \right].$$

Анализ расчётных зависимостей свидетельствует о том, что с увеличением шероховатости рабочей зоны цилиндра увеличивается зона отслоения покрытия от волокна в связи с трением на этом участке с поверхностью поршня.

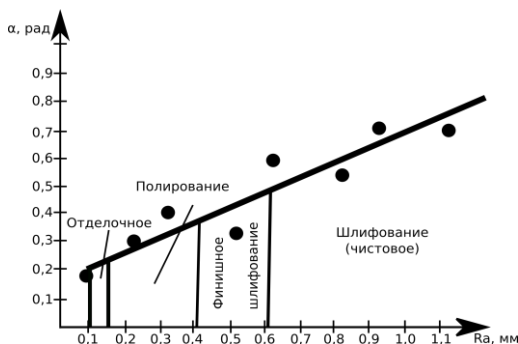


Рисунок 2. Влияние режимов обработки цилиндрической группы с покрытием на её характеристики

А это значит, что разрушение покрытия произойдёт в том случае, когда технологические напряжения по величине будут превосходить прочность сцепления $\sigma_{сц}$.

На рис. 2 представлен режим обработки рабочих поверхностей цилиндра, которые обеспечивают необходимую шероховатость для сохранения функциональных свойств группы поршень-цилиндр с покрытием [0 - 0].

Результаты

Для обеспечения требуемой надёжности и долговечности

цилиндрической группы с покрытием необходимо при нанесении покрытий на их рабочих поверхностях обеспечить шероховатость $0,8 \leq R_a \leq 1,2$. Такую шероховатость можно достичь за счёт операций финишного шлифования и последующего отделочного полирования.

Разработка технологических критериев для управления процессом бездефектного шлифования осуществлена на базе установленных функциональных связей между физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов цилиндрической группы и покрытий и основными технологическими параметрами.

Качество обрабатываемых поверхностей цилиндрической группы будет обеспечено, если с помощью управляющих технологических параметров подобрать такие режимы обработки, смазочно-охлаждающие среды и характеристики инструмента, что текущие значения температуры шлифования $T_i(r, \tau)$ и теплового потока $q(r, \tau)$, напряжений $\sigma(r, \tau)$ не будут превосходить своих предельных значений [0].

Реализация системы ограничивающих неравенств по величинам самой температуры и глубине её распространения в виде:

$$T(r, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\tau_1}^{\tau_2} f(r, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M \quad (21)$$

$$T(R_2, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\tau_1}^{\tau_2} \psi(r_b, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{c.n.} \quad (22)$$

$$T_k(r, \tau) = \frac{C v_{kp}}{\pi \lambda L \sqrt{v_g}} \int_0^\tau \int_{-\theta}^\theta \frac{\chi(\eta, t) \vartheta^{\frac{(r-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}} + \right. \\ \left. + \gamma \vartheta^{\nu^2(\tau-t)} [1 + \Phi(r\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T] \quad (23)$$

$$T_k^{max}(r, 0) = \frac{C v_{kp} \alpha}{\lambda r v_g^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_g \sqrt{Dt_{шл}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T] \cdot |_{R_1, 0 \leq \tau \leq R_1} \quad (24)$$

позволяет избежать образования шлифовочных прижогов и может послужить основой для проектирования циклов шлифования по тепловому критерию.

Обработку материалов и сплавов без шлифовочных трещин можно обеспечить, если ограничить формирующиеся в зоне интенсивного охлаждения напряжения предельными значениями:

$$\sigma_{max}(r, \tau) \cdot |_{r=R_1} = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_r T_k \vartheta^{rf} \left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) \leq [\sigma_{cu}] \quad (25)$$

Для подтверждения адекватности аналитической модели были проведены трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂, полученные методом электрохимического осаждения (рис. 3) [9].

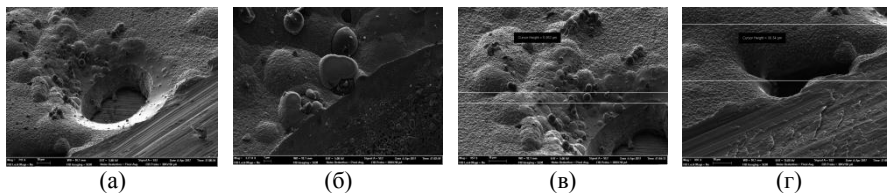


Рисунок 3. Исследование композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂ в сканирующем электронном микроскопе: (а) нарушение покрытия, (б) частицы TiO₂, (в) измерение диаметра частицы, (г) измерение толщины покрытия

После проведения трибокоррозионных исследований материалов Ni/Ni-TiO₂ определено, что для покрытия Ni заметно увеличение глубины и ширины трещин в зависимости от увеличения нагрузки при неизменном времени воздействия. При этом профиль трещин для покрытия Ni-TiO₂ с увеличением нагрузки не меняется. В связи с этим можно выделить положительное влияние частиц TiO₂ в покрытии, которые увеличивают защитные функции покрытия от механического истирания, при этом величина нагрузки для Ni-TiO₂ перестаёт играть столь существенную роль.

Выводы

Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием, позволяющая осуществить рациональный выбор технологических параметров обработки этих изделий по приведённым критериям для обеспечения бездефектной обработки. Адекватность полученной модели проверялась экспериментальными исследованиями композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂ полученные методом электрохимического осаждения.

Список использованной литературы: 1. Гаркунов Д. Н., Корник П. И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин : монография. Москва : Издательство МСХА, 2003. 343 с. 2. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber. Journal of Engineering for Industry. 1986. Т. 108. №. 4. Р. 247–251. 3. Усов А. В., Батырев А. А. Математическое моделирование процессов контроля покрытий элементов конструкций на базе сингулярных интегральных уравнений. Проблемы машиностроения. 2010. Т. 13, № 1. С. 65–75. 4. Оборский Г. А., Дациенко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем : монография. Одесса : Астропринт, 2013. 664 с. 5. Балохонов Р. Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах : монография / отв. ред. В. Е. Панин. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. 520 с. 6. Якимов А. В., Слободяник П. Т., Усов А. В. Теплофизика механической обработки. К. Одесса : Лыбидь. 1991. 240 с. 7. Carslaw H. S. Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids (Classic Reprint). United Kingdom, London: Fb&c Limited, 2017. 284 p. 8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. United Kingdom, Oxford : Clarendon Press, 1986. 510 p. 9. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения / пер. с нем. под ред. Г. С. Шапиро. Москва: Физматлит. 1963. 252 с. 10. Попов Г. Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов разрезом тонких включений и подкреплений. Москва : Наука, 1982. 344 с. 11. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, рядов и произведений : монография. 7-е изд., пер. с англ. / науч. ред.: Алан Джеффри, Даниэль Цвиллингер. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. 1232 с. 12. Сторожев В. П. Причины и закономерности постепенных отказов основных

триботехнических объектов энергетической системы судна и повышение их ресурса. Одесса : Сторозhev B. П. 2001. 341 с. 13. Sun Y., Flis-Kabulska I., Flis J. Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Materials Chemistry and Physics. 2014. T. 145. № 3. P. 476–483. 14. Aruna S. T., Grips V. K. W., Rajam K. S. Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties. Journal of Alloys and Compounds. 2009. T. 468. № 1–2. P. 546–552. 15. Chen L., Wang L., Zeng Z., Xu T. Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Surface and Coatings Technology. 2006. T. 201. № 3–4. P. 599–605. 16. Kim K. T., Kim D. W., Kim S. H., Kim C. K., Choi Y. J. Synthesis and improved explosion behaviors of aluminum powders coated with nano-sized nickel film. Applied Surface Science. 2017. T. 415. P. 104–108. 17. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing engineering and technology. Upper Saddle River, NJ, USA : Pearson, 2014. 913 p. 18. Левченко А. А. Влияние технологической наследственности при производстве запасных частей на наводораживание деталей и их износостойкость. Проблемы техники. 2006. №2. С. 23–28. 19. Kunitsyn M. V., Usov A. V. Tribocorrosion research of Ni–Al₂O₃/TiO₂ composite materials obtained by the method of electrochemical deposition. Сучасні технології в машинобудуванні. Харків, 2017. вип. 12. С. 61–70.

Bibliography (transliterated): 1. Garkunov D. N., Kornik P. I. Vidy treniya i iznosa. Ekspluatatsionnye povrezhdeniya detalей машин : monografiya. Moskva : Izdatelstvo MSHA, 2003. 343 с. 2. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber. Journal of Engineering for Industry. 1986. T. 108. № 4. P. 247–251. 3. Usov A. V., Batyrev A. A. Matematicheskoe modelirovanie processov kontrolya pokrytij elementov konstrukcij na baze singulyarnykh integralnykh uravnenij. Problemy mashinostreniya. 2010. T. 13. № 1. S. 65–75. 4. Oborskiy G. A., Dashenko A. F., Usov A. V., Dmitrishin D. V. Modelirovanie sistem : monografiya. Odessa : Astroprint, 2013. 664 с. 5. Balohonov R. R. Poverhnostnye sloi i vnutrennie granicy razdela v geterogennykh materialah : monografiya / otv. red. V. E. Panin. Novosibirsk : Izd-vo SO RAN, 2006. 520 с. 6. Yakimov A. V., Slobodyanik P. T., Usov A. V. Teplofizika mekhanicheskoy obrabotki. K. Odessa : Lybid. 1991. 240 с. 7. Carslaw H. S. Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids (Classic Reprint). United Kingdom, London: Fb&c Limited. 2017. 284 p. 8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. United Kingdom, Oxford : Clarendon Press. 1986. 510 p. 9. Parkus G. Neustanovivshiesya temperaturnye napryazheniya / per. s nem. pod red. G. S. Shapiro. Moskva: Fizmatlit. 1963. 252 с. 10. Popov G. Ya. Koncentraciya uprugih napryazhenij vogle shtampov razrezov tonkikh vklucheniij i podkrepleniij. Moskva : Nauka, 1982. 344 с. 11. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. Tablicy integralov, ryadov i proizvedeniij : monografiya. 7-e izd., per. s angl. / nauch. red.: Alan Dzheffri, Daniel Cvillinger. Sankt-Peterburg : BHV-Peterburg, 2011. 1232 с. 12. Storozhev V. P. Prichiny i zakonomernosti postepennykh otkazov osnovnykh tribotekhnicheskikh obektov energeticheskoy sistemy sudna i povyshenie ih resursa. Odessa : Storozhev V. P. 2001. 341 с. 13. Sun Y., Flis-Kabulska I., Flis J. Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Materials Chemistry and Physics. 2014. T. 145. № 3. P. 476–483. 14. Aruna S. T., Grips V. K. W., Rajam K. S. Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties. Journal of Alloys and Compounds. 2009. T. 468. № 1–2. P. 546–552. 15. Chen L., Wang L., Zeng Z., Xu T. Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Surface and Coatings Technology. 2006. T. 201. № 3–4. P. 599–605. 16. Kim K. T., Kim D. W., Kim S. H., Kim C. K., Choi Y. J. Synthesis and improved explosion behaviors of aluminum powders coated with nano-sized nickel film. Applied Surface Science. 2017. T. 415. P. 104–108. 17. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing engineering and technology. Upper Saddle River, NJ, USA : Pearson, 2014. 913 p. 18. Levchenko A. A. Vliyanie tehnologicheskoy nasledstvennosti pri proizvodstve zapasnykh chastej na navodorazhivanie detalей i ih iznosostojkost. Problemy tekhniki. 2006. №2. S. 23–28. 19. Kunitsyn M. V., Usov A. V. Tribocorrosion research of Ni–Al₂O₃/TiO₂ composite materials obtained by the method of electrochemical deposition. Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni. Harkiv, 2017. vip. 12. S. 61–70.

Надійшла до редколегії 25.07.2018